第65卷 第3期 天 文 学 报 Vol. 65 No. 3
2024年5月 ACTA ASTRONOMICA SINICA May, 2024
doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2024.03.009

硬X射线成像仪量能器测试系统的设计与实现*

陈娇龙[1,2] 张永强[1†] 张 岩[1] 郭建华[1,2]
(1 中国科学院紫金山天文台暗物质与空间天文重点实验室 南京 210023)
(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)

摘要 硬X射线成像仪(Hard X-ray Imager, HXI)是先进天基太阳天文台(Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S)的3大载荷之一, 其中量能器作为其重要组成部分, 承担着观测30–200 keV能段的太阳硬X射线的任务. 在卫星发射之前, 需要开展大量的测试工作, 以确保HXI量能器的各项功能和性能满足设计需求. HXI量能器通道数众多, 内含99个溴化镧探测器, 分别由8块相同的前端电子学板控制. 除了对各个通道的性能进行测试外, 地检系统还需模拟量能器在轨面对不同太阳活动时的运行情况, 对量能器进行全面完备的测试. 此外, 地检系统还需足够稳定, 能满足量能器在单机测试、环境试验、热真空与振动等多个不同测试项目的长时间测试需求. 为此, 设计了地检板与上位机软件, 结合放射源、直流电源、高压模块等组成一套HXI量能器的地检系统, 对8块前端电子学板实现同步配置与管理, 能高效完成指令发送与数据接收, 满足量能器最大数据输出带宽400 Mbps的需求. 利用该系统, 在地面完成了HXI量能器的功能、性能验证, 获得了量能器的线性、死时间、能量分辨率等各项性能指标, 为HXI量能器的在轨高性能运行提供了保障.

关键词 望远镜: 先进天基太阳天文台, 仪器: 硬X射线成像仪, 仪器: 量能器, 仪器: 地检系统
中图分类号: P171; **文献标识码**: A

1 引言

耀斑和日冕物质抛射是太阳上最剧烈的两类爆发现象. 它们会在短时间内释放出巨大的能量, 期间可能产生的从无线电到伽马射线的全波段辐射、高能粒子、高速物质流等, 都可能对地球环境造成灾难, 影响人类生存. 目前已知这两类爆发现象由太阳磁场变化产生, 但具体的变化产生机制尚未完全清楚. 因此, 同时观测太阳磁场、太阳耀斑、日冕物质抛射, 并研究这3者之间的关系具有重要意义[1–3].

先进天基太阳天文台(Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S)是中国科学院空间科学先导专项规划的第二批科学卫星之一, 搭载了3个科学载荷: Lyman-α太阳望远镜(Lyman-alpha Solar Telescope, LST)、全日面矢量磁像仪(Full-disk vector MagnetoGraph, FMG)和硬X射线成像仪(Hard X-ray Imager, HXI), 以实现对太阳磁场、太阳耀斑及日冕物质抛射的观测及内在关系的研究[1–6]. ASO-S卫星已于2022年10月发射成功.

HXI旨在实现高时间分辨率和空间分辨率的太阳硬X射线成像观测, 由准直器(Collimator)、量能器(Calorimeter)和电控箱(Electronic Control

2023-03-23收到原稿, 2023-06-27收到修改稿
*国家自然科学基金项目(12227805)、中国科学院空间科学战略先导专项(XDA15320104)、中国科学院青年创新促进会项目(2022321、2021316)、中国科学院科学仪器发展项目(GJJSTD20210009)资助
†yqzhang@pmo.ac.cn

Box)3部分构成, 如图1所示. 当太阳硬X射线入射至准直器, 会先经过傅里叶光栅调制, 其后将由量能器测量, 获得流量和能谱信息. 在接收到电控箱指令后, 量能器将数据传至电控箱进行收集汇总. HXI的科学数据最终由卫星平台发送至地面, 最后经过地面数据处理完成图像重建工作, 由此实现在30–200 keV能段对太阳硬X射线的成像观测[3–8].

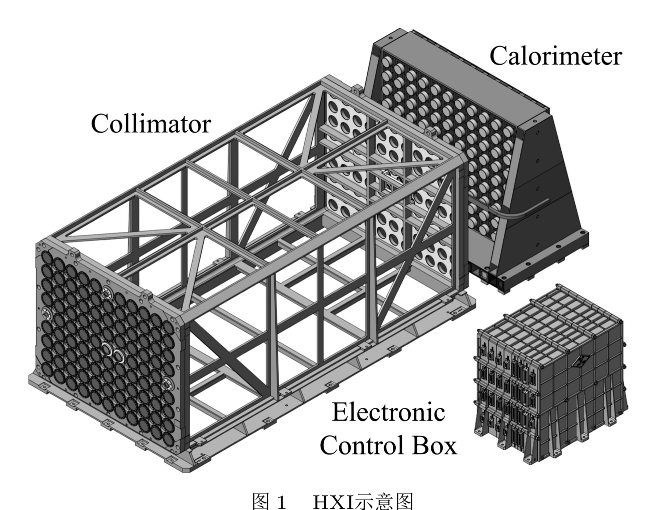


图 1　HXI示意图

Fig. 1　Schematic of the HXI

量能器是HXI的核心部件, 由99个探测单元及相应的读出电子学系统和高压分配电路构成, 如图2所示. 每个探测单元由1个溴化镧($LaBr_3$)晶体和1个光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)组成, PMT由高压(High Voltage, HV)分配电路供电. 99个探测单元的输出信号共由4块前端电子学板接收, 每块电路板包含2套完全相同的前端读出电子学(Front End Electronics, FEE), 共8个FEE. 每个FEE对应12或13个探测单元的输出通道, 主要由电荷测量芯片、模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)、数模转换器(Digital to Analog Converter, DAC)、运算放大器(Operational Amplifier, OPA)、现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)、接口电路这6个部分组成. FEE安装于探测单元正后方, 实现对探测单元输出信号的放大、成形和采集处理, 并将处理后的能谱和流量等科学数据通过科学数据接口定时发送给电控箱[3–5].

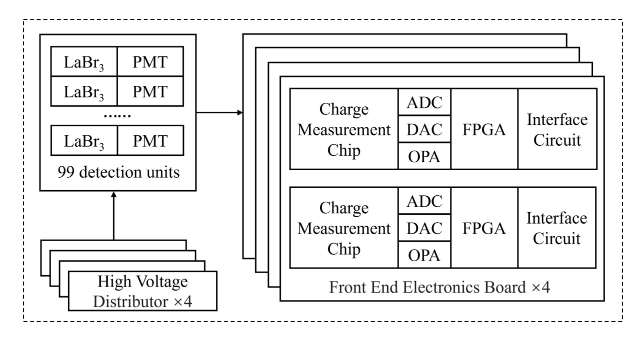


图 2　HXI量能器示意图

Fig. 2　Schematic of the HXI calorimeter

量能器的性能指标如表1所示[5]. 为了验证量能器各项功能和性能, 确保其满足设计需求, 在卫星发射前需要对其进行严格测试和在轨飞行模拟. 基于自研的软硬件, 我们设计量能器的地检系统, 实现对HXI量能器的电接口、功能、性能的完整测试. 本文将介绍量能器地检系统的设计及实现.

表 1　HXI量能器性能指标

Table 1　Performance requirements of the calorimeter

Performance	Range
Dynamic Range	0–800 pC
Dead Time	⩽ 2 μs
Energy Resolution	⩽ 27% @ 30 keV
Integral Non-Linearity	⩽ 2%
Equivalent Noise Charge	⩽ 500 fC

2　量能器在轨工作模式

ASO-S卫星在轨运行主要有3个工作阶段: 发射入轨后第一个月为在轨测试阶段, 随后进入对日观测阶段, 并在4年寿命期内根据需要不定期进入标定阶段. 为了配合ASO-S卫星的运行, HXI量能器单机设计了3种不同的工作模式: 用于配置各项参数和工作状态寄存器的配置模式、用于进行各个通道电子学线性标定的标定模式、用于太阳硬X射线连续观测的观测模式. 各个工作模式的切换如图3所示.

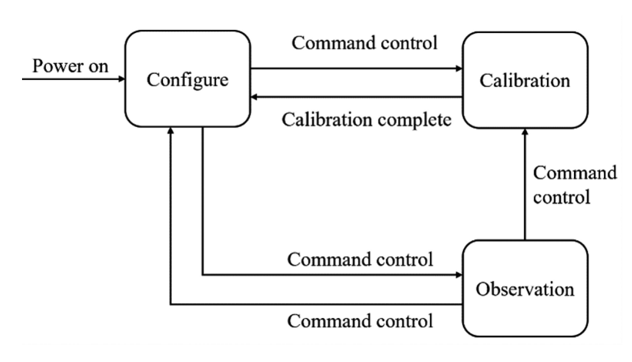


图 3　量能器运转模式示意图

Fig. 3　Schematic of calorimeter operation mode

2.1　配置模式

在该模式下, HXI电控箱可以通过指令/状态接口配置量能器FEE内部所有寄存器, 注入电荷测量芯片工作所需的配置参数和各项阈值. 量能器单机开机加电后默认进入该模式, 量能器任何配置参数的更改和调整均需切换至配置模式进行. 在配置模式下, 量能器不进行采集工作, 也不响应电控箱的采集同步信号.

2.2　标定模式

在该模式下, 量能器通过自身的DAC芯片和模拟开关芯片对电荷测量芯片注入给定的电荷, 测量电子学系统线性. 线性标定模式按通道进行, 接收到来自电控箱的采集同步信号后, 先结束当前通道的采集并上传当前通道的数据, 其后切换至下一通道. 每通道标定时间不大于采集同步间隔时间(4 s), 每次标定均需发送14次采集同步信号来完成单个FEE板上的所有电子学通道的标定. 为了节约标定时间, 8个FEE电路将同时进行标定.

2.3　观测模式

在该模式下, 量能器FEE根据电控箱的采集同步信号定时累积能谱科学数据, 并通过低压差分信号(Low Voltage Differential Signaling, LVDS)接口输出. 电控箱根据测得的事例计数值更改采集同步时间间隔. 在该模式下量能器可根据电控箱请求输出各项遥测工程参数, 但不接收任何更改配置参数的指令(更改当前工作模式指令除外). 在该模式下, 卫星经过极区和南大西洋异常区时, 会降低量能器上的光电倍增管高压, 以延长使用寿命.

3　地检系统设计

HXI量能器测试需要根据量能器在轨运行的各个工作模式, 验证HXI量能器和电控箱之间的各种接口通讯协议、量能器软硬件功能及性能, 由此需要一套地检系统来模拟HXI电控箱的功能和地面运控指令, 并接收量能器的科学数据和工程参数. 同时, 地检系统也需满足为量能器FEE供电、为量能器探测单元提供高压等需求. 另外, 对于卫星工程研制来说, HXI量能器地检系统不仅是量能器FEE单板测试、单机测试和环境试验项目的重要支撑和保障, 还是HXI标定系统[9–11]的重要组成部分.

根据设计需求, 量能器的地检系统主要由放射源(Radioactive Source)、地检板(Ground Test Board)、上位机(Host Computer)、直流电源(Direct-current Power, DC power)、高压模块(HV module)5个部分组成, 如图4所示. 量能器与地检板之间通过RS-422与LVDS接口连接, 地检板与上位机之间通过通用异步收发传输器(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART)与通用串口总线(Universal Serial Bus, USB)连接.

直流稳压电源分别为HXI地检板、高压模块和量能器FEE提供所需电压. 高压模块将24 V输入转换为0–1000 V输出, 可依据实际需求灵活配置, 为量能器的PMT提供合适的电压. HXI量能器FEE与HXI地检板均使用5 V供电. 上位机将指令通过UART发送至地检板, 地检板接收指令后通过RS-422接口转发至量能器. 放射源的粒子入射至量能器后, 其能谱等信息被提取, 作为科学数据通过LVDS接口送至地检板, 地检板将接收到的来自8块FEE的数据整合打包后, 通过USB上传至上位机. 量能器运行时的工程参数通过RS-422接口传到地检板, 再由UART传送至上位机. 上位机负责处理接收到的科学数据与工程参数并可视化.

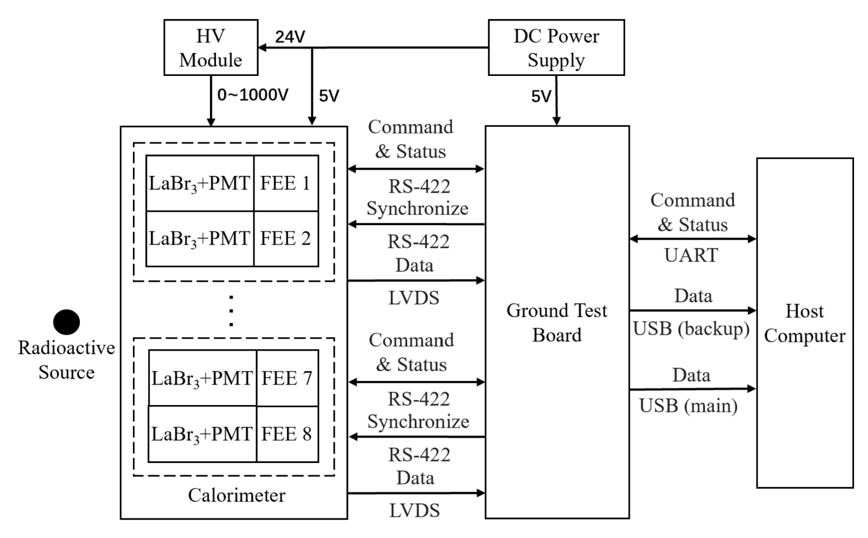


图 4　地检系统框图

Fig. 4　Schematic diagram of ground test system

4　地检板实现

HXI量能器地检板是地检系统的核心. 地检板主要完成3项任务: 依据接口通信协议、模拟HXI电控箱与量能器FEE的通信; 将上位机的指令转发给量能器FEE, 将量能器FEE的应答信息和科学数据上传给上位机; 监测和记录通信状态, 辅助故障排查.

地检板一端连接量能器FEE, 完成指令的转发、工程参数和科学数据的收集; 另一端连接上位机, 接收来自上位机的指令, 并将量能器FEE的工程参数和科学数据发送给上位机.

地检板由晶振、电源、核心控制器、上位机通信接口及量能器通信接口组成, 硬件框图如图5所示, 实物图如图6所示. 许多应用场景都要求地检板同时与8个FEE进行通信, 且地检板与FEE通信接口时序要求较为严格. 为了满足测试过程中对地检板较强的并行处理和精确时序控制的要求, 选择FPGA作为地检板核心控制器.

4.1　与量能器通信接口

地检板与量能器的接口包括指令/状态接口、采集同步接口和科学数据接口. 量能器端为热备份, 地检板端接口常加电. 备份数据和主份数据有着独立的、完全一致的两套收发系统.

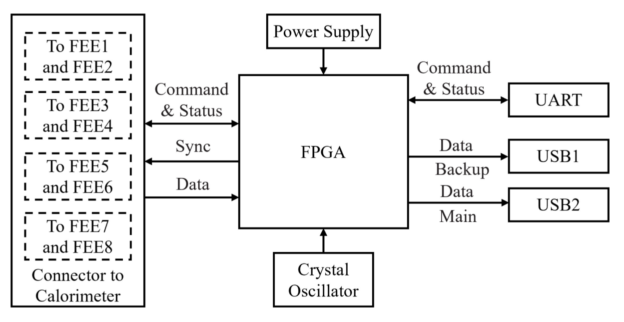


图 5　地检板框图

Fig. 5　Schematic diagram of ground test board

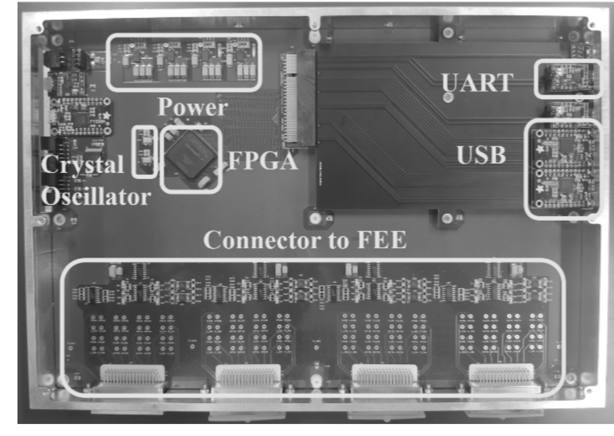


图 6　地检板实物图

Fig. 6　Image of ground test board

4.1.1 指令/状态接口

指令/状态接口采用半双工RS-422接口, 接口电路如图7所示, TX与RX分别表示发送与接收, A与B分别表示主份与备份. DS26LV31与DS26LV32为CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)差动线路驱动器, 前者将单端输入转为差分输出, 后者将差分输入转为单端输出. 接口采用UART协议, 传输一个数据共需要11位, 含1位起始位, 8位数据位, 1位奇校验位和1位停止位, 波特率设置为115200 bps.

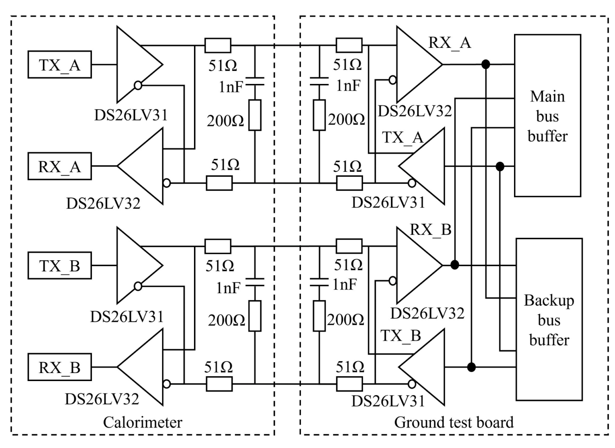


图 7 指令/状态接口电路图

Fig. 7 Circuit diagram of instruction and state interface

对于卫星设备而言, 可靠性永远是第一位, 因此主机和从机的通讯对时序有严格的规定. 通信协议采用主从应答式协议, 地检板为主机, 量能器FEE为从机. 每次通信由主机发起请求, 发送一帧数据(10字节固定长度). 如果从机判断通信正确, 随后进行应答, 发送一帧数据(36字节固定长度). 从机不能在无主机请求的情况下主动进行通信. 主机和从机在发送多字节数据时, 后一个字节的起始位与前一个字节的停止位之间的间隔时间需大于2位宽(约17 μs)且小于5位宽(约43 μs). 若大于等于5位宽, 则从机判定本次传输无效, 不发出应答数据. 若主机在规定时间(50 μs到15 ms之间)内没有接收到从机发出的应答数据, 则判定当前通道上此次的信号传输失败, 并提供错误信息用于链路诊断.

4.1.2 采集同步接口

HXI量能器有8个FEE, 需要地检系统同步所有FEE的能谱累积时间[3, 5]. 采集同步接口采用RS-422单工形式, 接口电路如图8所示. 为了提高信号的抗干扰能力, 量能器与地检板之间采用差分传输.

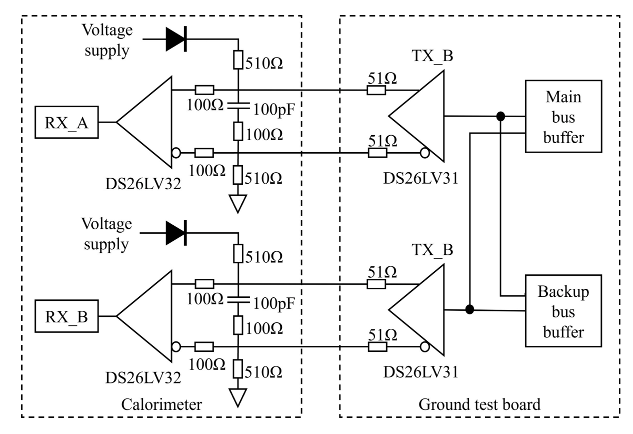


图 8 采集同步接口电路图

Fig. 8 Circuit diagram of acquisition sync interface

4.2 科学数据接口

地检板通过科学数据接口接收来自量能器FEE的科学数据. 接口采用LVDS单工形式, 量能器端发送芯片使用SN55LVDS31, 将单端的LVTTL (Low Voltage Transistor-Transistor Logic)信号转为LVDS, 地检板接收芯片使用SN55LVDS32, 将LVDS转为LVTTL, 提高传输过程中信号的抗干扰能力. 接口电路图9所示.

为了减少电缆数量, 不同于传统的三线制, HXI量能器的科学数据接口采用双线制传输协议. 量能器端在时钟下降沿发送数据, 电控箱(地检板)端在时钟上升沿接收数据. 科学数据接口以字节作为数据传输的基本单位, 高位先行. 空闲(idle)状态时, 数据线与时钟线为高电平; 数据传输结束后, 数据线与时钟线仍回到高电平. 时钟信号频率为25 MHz (占空比为50% ± 5%), 量能器发送端(发送芯片输出端)时钟下降沿和数据的偏移小于时钟周期的10% (4 ns). 接口信号时序如图10所示. 经过测试表明, 双线制能够长时间可靠地保证数据的传输. 为了保证科学数据的可靠性, 科学数据采

用了CRC检错纠错码.

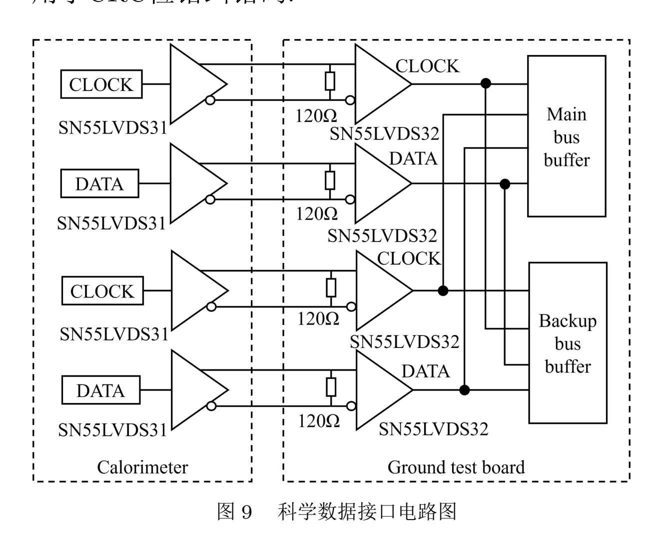


图 9 科学数据接口电路图

Fig. 9 Circuit diagram of scientific data interface

4.3 与上位机通信接口

借鉴量能器FEE与电控箱的通信方式, 地检板与上位机的通信同样设计了两种通信接口: (1)控制接口—与上位机双向通信, 用于指令的发送、工程参数的收集, 数据量小, 每秒上下行不大于5 kB; (2)科学数据上传接口—用于科学数据的传输, 地检板每秒向上位机上传数据最多可达4 MB.

控制接口选用USB转UART通信模块LC234X, FPGA通过串口与该模块连接, 采用UART通信协议, 波特率为921600 bps. 安装模块驱动后, 上位机识别模块为虚拟串口, 该模块最大传输速率可达3 Mbps.

科学数据上传接口选用USB2.0通信模块FT 232H Breakout, FPGA通过8位位宽的并口与该模块连接, 采用FTDI (Future Technology Devices International)公司定义的FT1248接口. 安装模块驱动后, 上位机识别模块为USB2.0接口, 该模块最大传输速率可达480 Mbps.

量能器FEE科学数据接口采用热备份, 为了较为方便地区分来自主备接口的科学数据, 地检板与上位机的科学数据接口采用的两个独立FT232H Breakout模块, 分别负责主备接口科学数据的上传, 上位机也将来自主备接口的科学数据各自存储为独立的文件.

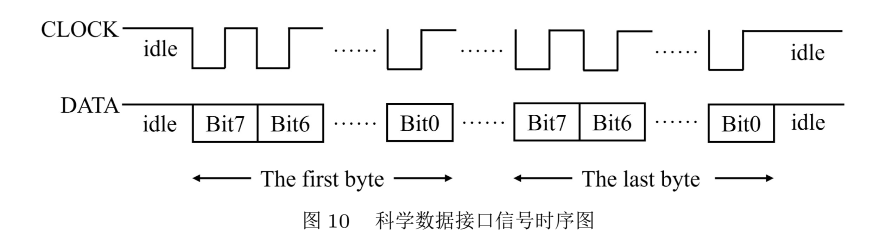


图 10 科学数据接口信号时序图

Fig. 10 The signal timing diagram of the scientific data interface

4.4 FPGA

FPGA是地检板的核心, 我们选用Intel公司Cyclone V 5CEA9. 该芯片有301000个逻辑单元, 342个数字信号处理区块, 224个通用输入/输出管脚, 8个锁相环路, 能够满足地检板的应用需求.

依据实际的数据传输处理链路, FPGA的功能模块被设计为4部分, 如图11所示: (1)指令转发; (2)接口监测与工程参数上传(下文简称接口监测模块); (3)采集同步信号生成; (4)科学数据接收、汇总和发送(下文简称科学数据模块). 指令转发模块负责转发来自上位机的指令, 待HXI量能器配置完成后, 采集同步信号模块按照上位机的要求生成相应次数与间隔的采集同步信号, 其后科学数据模块负责接收来自量能器的科学数据, 并将其汇总上传至上位机. 整个过程期间, 接口检测模块随时准备接收上位机指令, 将已有的工程参数与监测信息上传.

4.4.1 指令转发模块设计

在量能器FEE测试过程中, 通常需要发送大量的指令. 例如, 每个量能器FEE的初始化操作需要75条配置指令, 当量能器FEE完成对上一条指令的应答后, 才能发送下一条指令, 仅完成8个量

能器FEE的初始化配置就需要600次指令发送与应答. 上位机软件基于Labwindows/cvi开发, 在Windows操作系统下运行, 不具备精确的实时性, 既难以控制发送指令的精准时间, 也无法在量能器FEE应答结束后, 及时地发送下一条指令. 因此, 通过上位机直接控制逐条指令收发的节奏, 效率较低. 为了提高测试效率, 在地检板FPGA中设计指令缓存区. 上位机可以一次性将多条指令发送至地检板, 暂存于FPGA中的指令缓存区中, 如图12所示. FPGA读取缓存区指令, 发送给相应的量能器FEE, 等待量能器FEE指令应答结束后, 立即检查指令缓存区, 直至所有指令发送完毕. 该设计大大提高了测试效率, 在量能器的各级测试乃至标定试验中, 发挥了重要作用.

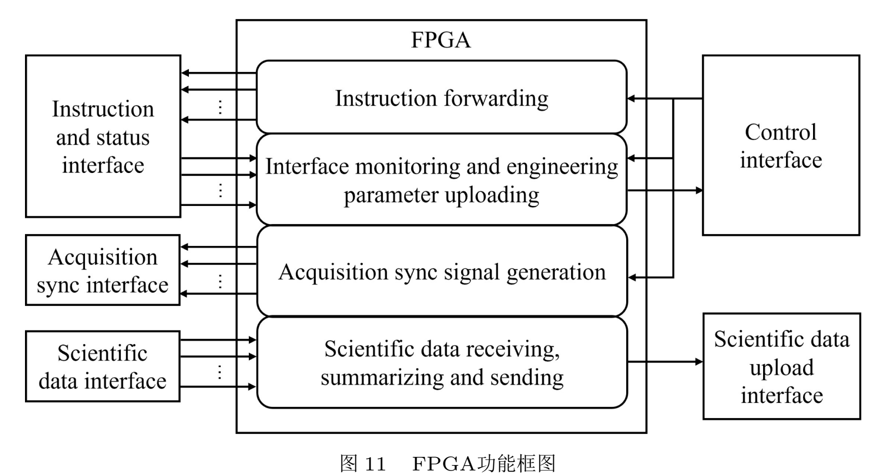


图 11 FPGA功能框图

Fig. 11 Function diagram of FPGA

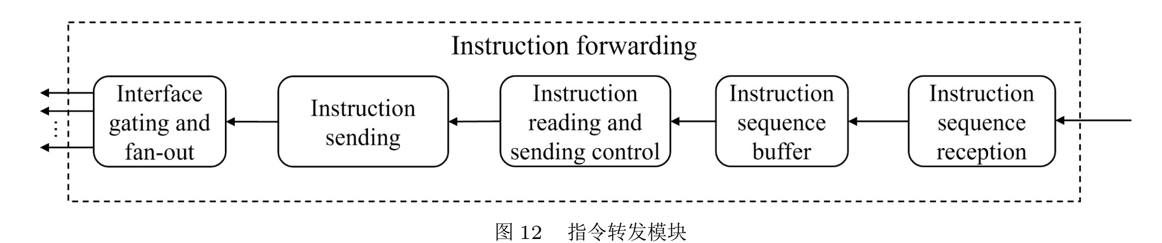


图 12 指令转发模块

Fig. 12 Instruction forwarding module

4.4.2 接口监测模块设计

指令/状态接口是量能器FEE同外部设备交互的桥梁: 量能器FEE的工作参数设置、工程参数轮询和工作模式切换, 全都需要通过指令/状态接口注入指令控制实现; 实际工作时, 量能器FEE的工程参数, 也需要通过指令/状态接口上传至HXI电控箱. 当上位机发送的指令未能如预期执行或工程参数未能收到时, 首要措施即是对指令/状态接口进行故障排查定位, 而最直接有效的排查定位方式, 就是对该接口进行实时监测和记录. 在电路板级测试阶段, 尚可通过示波器或逻辑分析仪, 直接测量和监测指令/状态接口信号, 但这在长期的、单机级的测试和环境试验中不可行. 为此, 地检板利用FPGA内部灵活的硬件可编程特点, 在FPGA中设计了接口监测模块, 在不干涉通信的前提下, 对整个通信过程进行了实时监听和记录, 为可能的故障定位提供依据, 其主要包括以下两个方面:

一方面, 由于指令/状态接口对时序要求较为严格, 需要确保量能器FEE在通信过程中, 满足接口时序要求. 具体监测的内容主要包括校验位检查、发送字节间隔以及应答间隔. 监测过程

中, 一旦监测到发生不符合接口要求的情况, 地检板FPGA会将错误状态信息打包放入当前的通信记录中, 发送给上位机. 上位机收到状态错误信息后, 将在界面上显示.

另一方面, 指令/状态接口上的每条通信记录都被独立打包, 存入专设缓存中. 指令/状态接口通信层采用主从应答式协议, 主机发送指令后, 从机应答为36字节工程参数, 所以, 接口监测模块在实现了对指令/状态接口实时监控的同时, 还完成了对量能器FEE工程参数的收集和汇总.

接口监测模块设计如图13所示. 上位机每秒向地检板发送一次通信记录数据上传请求, 地检板收到请求后, 将前一秒收到的所有通信消息一次性全部发送给上位机. 上位机通过解析, 对报错信息和工程参数进行实时存储和显示.

4.4.3 采集同步信号模块设计

HXI量能器的所有探测单元需要协同工作, 对同一时段内的太阳硬X射线能谱进行观测. 因此需要一个采集同步信号, 实现8个FEE间的同步管理, 如图14所示.

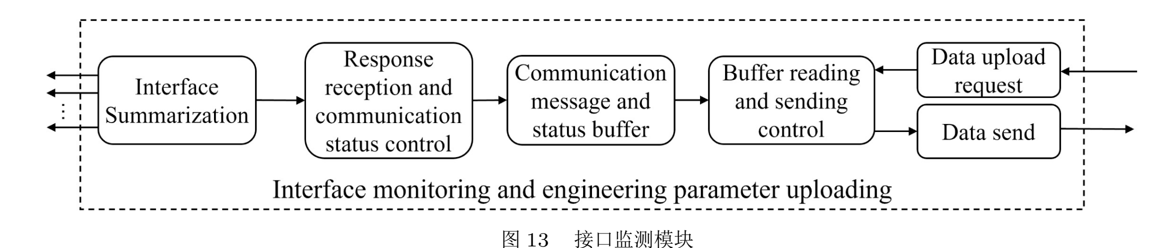


图 13 接口监测模块

Fig. 13 Interface monitoring module

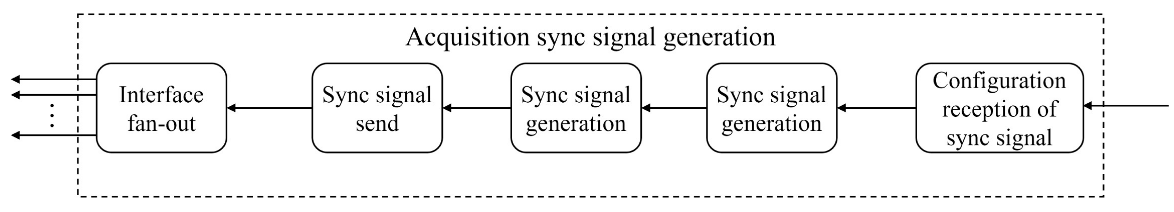


图 14 采集同步信号模块

Fig. 14 Acquisition sync signal module

处于观测模式或标定模式的量能器检测到采集同步信号后, 会将采集到的累积能谱数据上传. 采集同步信号的间隔即为能谱的累计时间. 采集同步信号间隔如果太小, 那么相同单位时间内需要传输较大的数据量, 这对传输信道容量有较高要求; 采集同步信号间隔如果太大, 当太阳活动剧烈时, 粒子计数率较高会导致采集到的能谱计数饱和, 同时也无法获得好的时间分辨率. 因此, 采集间隔不应为固定值, 而需可以根据需求调整, 保证太阳活动剧烈时期的时间分辨率, 同时降低太阳平静时期的数据率.

地检板FPGA通过控制定时器来实现不同周期的采集同步信号脉冲的产生. 采集同步信号采用脉冲方式发送定时信息, 脉冲信号为低电平有效, 宽度(500 ± 50) ns. 另外, HXI量能器单机标定试验过程中, 通常需要量能器对能谱进行定时采集, 因此, 地检板FPGA还设计了采集同步信号发送次数控制功能. 采集同步信号的间隔和发送次数, 都可由上位机指令配置.

4.4.4 科学数据模块设计

在观测或标定模式下, 每个量能器FEE在收到采集同步信号后的8 μs至16 μs内, 将通过科学数据接口同时发送相应科学数据包, 数据包长度为30994字节.

不同于常见的三线制, 科学数据接口为二线制, 只有时钟和数据, 没有使能信号. 当时钟产生

时, 最初几个时钟会产生形变. 为此, 在数据包开头添加固定2字节5AA5, 避免科学数据出现在最初的几个时钟而出错. FPGA的科学数据接口设计中, 会对科学数据包头进行检测, 确保数据包的正确识别.

考虑到量能器科学数据接口为热备份, 量能器地检板需要同时完成16路LVDS科学数据的并行接收, 数据总带宽最高可达400 Mbps. FPGA中, 为每路科学数据接口设计一个数据接收模块, 并单独分配一块数据缓存. 当采集同步信号发出后, 量能器FEE会在10 ms内完成科学数据的传输, 由数据接收模块完成串并转换, 存入缓存. 数据接收完成后, 依次读取各缓存, 通过并行接口将缓存数据发送给地检板上USB2.0模块, 如图15所示.

5 上位机软件实现

利用Labwindows/cvi平台开发了上位机软件, 便于测试人员操作并直观分析结果.

为了优化界面、降低测试人员的操作难度、提高程序的可移植性, 我们将软件分为独立两个部分: 第一部分通过串口实现FEE参数配置、采集同步信号配置、工程参数的接收、运行状态的显示、日志管理等; 另一部分通过USB实现数据接收存储与解析, 并以图像的形式显示能谱与计数率的实测结果.

为了便于测试, 除了单条指令配置模式, 还设计了指令批量注入模式, 可将常用指令以文件的形式一次性注入, 从而简化配置过程. 上位机软件功能框图如图16所示.

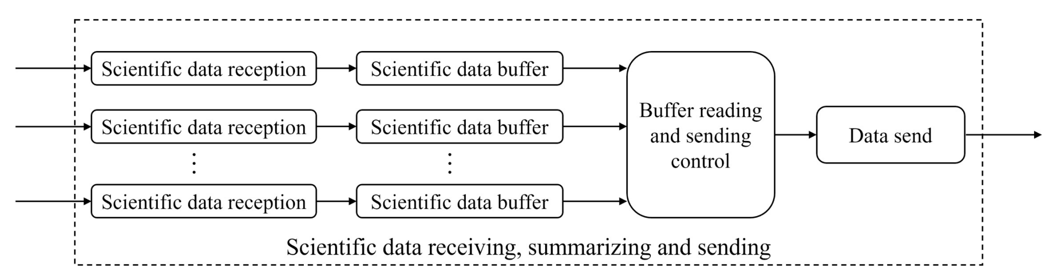


图 15 科学数据模块

Fig. 15 Scientific data module

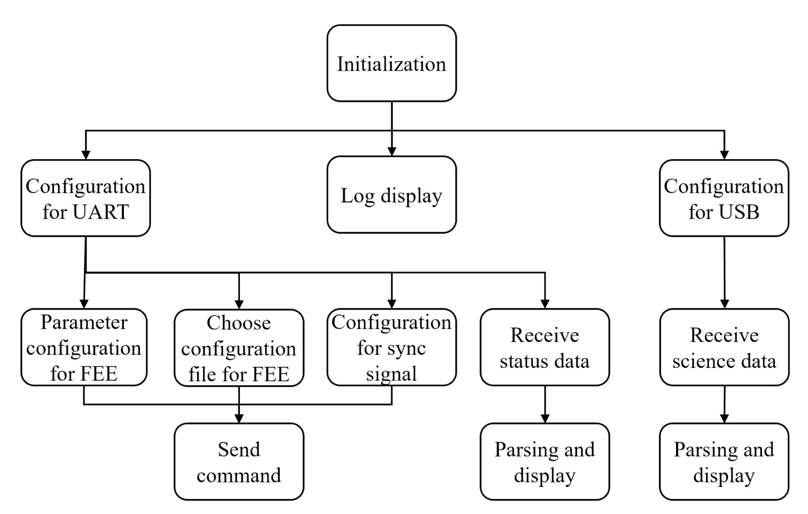


图 16 上位机软件功能框图

Fig. 16 Function diagram of host computer software

6　地检系统测试结果

量能器的测试主要分为功能测试、性能测试和接口测试. 功能测试验证量能器解析指令、采集数据、线性标定、过流保护等功能正常运转; 性能测试验证量能器是否满足各种时序要求以及死时间、能量分辨率等设计需求; 接口测试验证各类接口的稳定性与可靠性. 测试现场图如图17所示.



图 17　测试现场图

Fig. 17　Image of test site

6.1　标定模式

量能器将入射的太阳硬X射线转化为与其能量成正比的电荷量, 并由FEE将电荷量转化为对应的ADC道数. 通过线性标定, 可以获得ADC道数与电荷量具体的对应关系、确定量能器的线性范围. 由于工艺差异等原因, 量能器内的99个通道之间并非完全相同, 必须分别对量能器的每个电荷测量通道进行线性标定.

地检系统将标定所需的一系列指令集合为标定自动化序列, 一次性注入后即可实现所有通道的依次标定, 无需手动调整, 其后依次接收每个通道的标定数据并独立分析. 其中一个通道的某次线性标定结果如图18所示, 从中可见该通道有良好的非线性, 积分非线性低于2%, 且满足动态范围大于800 pC的要求. 电子学噪声使得对同一输入的多次读出结果呈现高斯分布, 取高斯拟合后的标准差作为电子学噪声. 图19为读出电子学系统的噪声水平示例, 由图可见满足读出电子学系统噪声小于500 fC的要求.

6.2　观测模式

观测模式下HXI量能器会根据太阳X射线的计数率来动态地调整采集间隔. 电控箱通过获得的计数率大小来调节同步信号的发送间隔, 从而控制量能器的采集间隔, 保证太阳活动剧烈时期的时间分辨率, 同时降低太阳平静时期的数据率, 由此提高量能器的观测效率, 并降低整体功耗. 地检系统通过配置不同的采集同步信号间隔来测试该模式. 将采集同步信号间隔分别配置为0.125 s、0.25 s、0.5 s、1 s、4 s, 获取其能谱并分析. 测得的^{133}Ba和^{241}Am能谱, 与放射源实际能谱相吻合. 图20为测得的^{133}Ba能谱图之一, 根据测试能谱计算分辨率结果, HXI量能器可以在31 keV、81 keV和356 keV分别获得21.7%、11.6%和4.4%的能量分辨率, 满足在30 keV分辨率优于27%的条件.

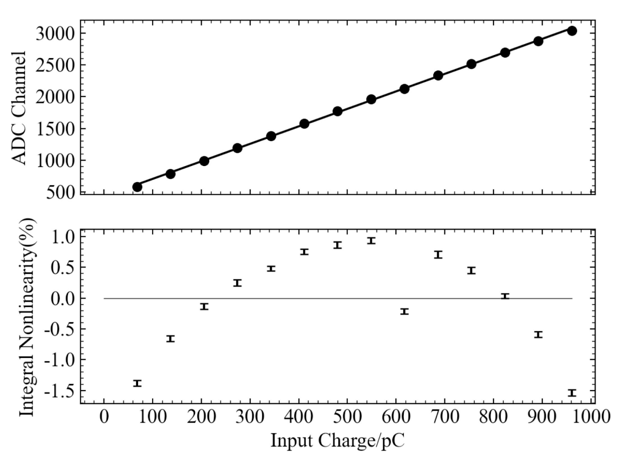


图 18　一个通道的线性标定结果示例

Fig. 18　Example of linear calibration results for one channel

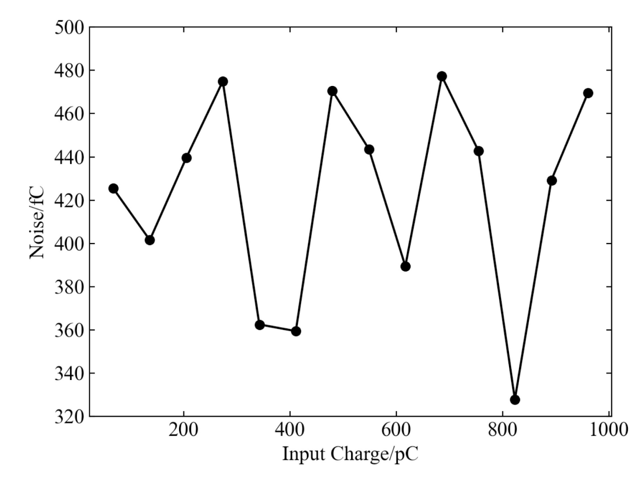


图 19　一个通道的读出电子学噪声示例

Fig. 19　Example of readout electronic noise for one channel

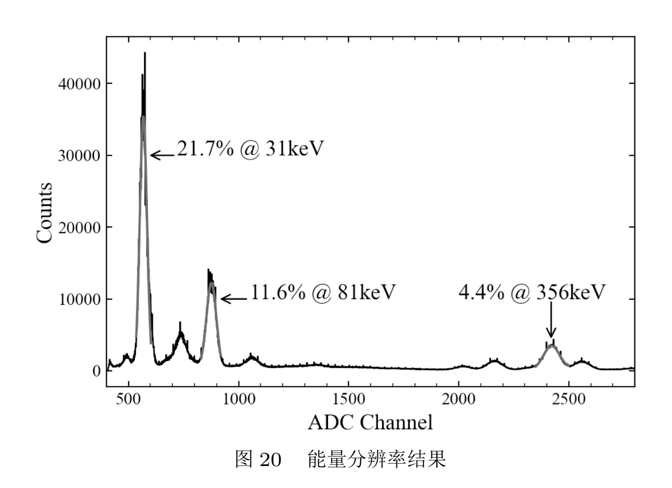


图 20 能量分辨率结果

Fig. 20 Result of energy resolution

6.3 其他测试

在上述的各项测试过程中, 已重复进行了多次对量能器的配置, 从而验证了配置模式下的各项功能正常, 3种模式间能顺利转换. 且在整个测试过程的多次指令配置与数据接收下, 所有接口都稳定运行, 各项功能正常运转, 量能器的可靠性也得到充分验证.

7 总结

HXI是ASO-S的3大载荷之一, 其上的量能器负责对调制后的X射线能谱进行测量. 为了确保量能器在轨稳定运行, 需要在卫星发射前对量能器进行全面测试. 本文设计并实现了一套HXI量能器地检系统, 由放射源、地检板、上位机、直流电源和高压模块5个部分构成, 利用FPGA高度集成地实现HXI量能器内99个探测器的联合测试, 完成对8块FEE板的同步管控、数据接收和处理. 同时, 为了完备地测试量能器, 地检系统模拟了量能器在轨运行时的3种模式, 分别对其测试, 并设计了接口监测功能, 在出现错误时能第一时间报错, 并显示相关错误信息. 另外, 基于测试效率考虑, 地检系统的上位机软件设计了例如指令的批量注入等便携的功能, 能够自动化地完成对量能器的测试和验证工作, 大大减轻了测试人员的工作强度. HXI量能器目前已在轨运行6个月, 侧面证明地检系统的完备性. HXI量能器地检系统的设计和应用经验对未来其他测试系统的开发具有重要的参考价值.

参考文献

[1] Gan W Q, Zhu C, Deng Y Y, et al. RAA, 2019, 19: 156
[2] 黄永益, 马涛, 张永强, 等. 天文学报, 2020, 61: 42
[3] 张岩, 郭建华, 张永强. 天文学报, 2019, 60: 44
[4] Zhang Y, Guo J H, Zhang Z, et al. Nuclear Science and Techniques, 2019, 30: 8
[5] Wan Q, Zhang Y, Guo J H, et al. JInst, 2022, 17: P02020
[6] 葛蕴翊, 黎辉, 黄宇, 等. 天文学报, 2020, 61: 46
[7] 陈维, 苏杨, 张哲, 等. 天文学报, 2020, 61: 41
[8] 喻福, 苏杨, 张哲, 等. 天文学报, 2020, 61: 40
[9] Liu W, Zhang Z, Wu J, et al. JInst, 2022, 17: P05045
[10] Chen D Y, Hu Y M, Zhang Z, et al. JInst, 2020, 15: T10008
[11] Zhang Z, Chen D Y, Wu J, et al. RAA, 2019, 19: 160

Design and Realization of the Calorimeter Test System for the Hard X-ray Imager

CHEN Jiao-long[1,2] ZHANG Yong-qiang[1] ZHANG Yan[1] GUO Jian-hua[1,2]
(1 Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)
(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract The Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S), as one of the second series scientific satellites in the space science pilot project, was proposed by the Purple Mountain Observatory of Chinese Academy of Sciences. ASO-S aims to observe and investigate the two solar eruptive phenomena, i.e., solar flares and coronal mass ejections, and their relationships with magnetic field. Hard X-ray Imager

(HXI) is one of the payloads aboard ASO-S. As an important part of HXI, the calorimeter is responsible for measuring solar hard X-rays in the energy range of 30–200 keV. Before the launch of ASO-S, a ground test system was necessary to verify the function and performance of the HXI calorimeter. There are 99 lanthanum bromide detectors in the HXI calorimeter, each controlled by 8 identical front-end electronic boards. In addition to testing the performance of each channel, the ground test system also needs to simulate the operation of the calorimeter under different solar activities in orbit, conducting a comprehensive test. Moreover, the ground test system needs to be stable enough to meet the long-term testing needs of the calorimeter in different tests, including standalone testing, environmental experiments, thermal vacuum and vibration tests. According to the test requirements, a ground test board and a software in the host computer were designed, combined with radioactive sources, a DC (Direct Current) power supply, and a high-voltage module to form a ground test system for the HXI calorimeter. It can simultaneously configure and manage 8 front-end electronic boards, efficiently complete command sending and data receiving, and meet the maximum data output bandwidth of 400 Mbps of the calorimeter. The ground test system can fully meet the requirement of automatic control, status monitoring, data acquisition and data analysis for the HXI calorimeter. Using this ground test system, all function and performance tests for the HXI calorimeter were completed with the acquisition of the noise, the dead time, the energy resolution and other performance data. The ground test system provides strong guarantee for the high performance operation of the HXI calorimeter in orbit.

Key words telescopes: ASO-S (Advanced Space-based Solar Observatory), instrumentation: HXI (Hard X-ray Imager), instrumentation: calorimeter, instrumentation: ground test system